

УДК 621.793

Б.А. Ляшенко, д-р техн. наук, С.А. Клименко, д-р техн. наук,  
Киев, Украина

## **ПРИМЕНЕНИЯ ДИСКРЕТНЫХ ПОКРЫТИЙ В РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТАХ**

*Розглянуто приклади практичного використання різальних інструментів з швидкорізальних сталей, твердих сплавів і кераміки з зносостійкими захисними покриттями. Показано, що інструменти з покриттями, що мають дискретну структуру, характеризуються більшою стійкістю і забезпечують отримання обробленої поверхні з меншою шорсткістю.*

*Ключові слова: різальний інструмент, зносостійкі покриття, дискретна структура*

*Рассмотрены примеры практического использования режущих инструментов из быстрорежущих сталей, твердых сплавов и керамики с износостойкими защитными покрытиями. Показано, что инструменты с покрытиями, имеющими дискретную структуру, характеризуются большей стойкостью и обеспечивают получение обработанной поверхности с меньшей шероховатостью.*

*Ключевые слова: режущий инструмент, износостойкие покрытия, дискретная структура*

*The examples of practical use of cutting tools made of high-speed steel, carbide and ceramic wear-resistant coating. It is shown that the coated tools having a discrete structure, characterized by longer lifetime and provides the treated surface with less roughness.*

*Keywords: cutting tool, wear-resistant coating, discrete structure*

### **Введение**

«Идеальный» материал режущего инструмента для высокопроизводительной механической обработки должен обладать комплексом специальных свойств: твердость и износостойкость алмаза, химическая стабильность керамики, ударная вязкость быстрорежущей стали. Он должен обладать высокой теплопроводностью и низкой чувствительностью к перепаду температур. Пока такой материал не создан, одной из основных тенденций совершенствования режущих инструментов является нанесение на их рабочие поверхности износостойких защитных покрытий.

По мере расширения номенклатуры обрабатываемых и инструментальных материалов, конструкций и геометрических параметров режущих инструментов защитные покрытия становятся все более многообразными.

Покрyтия дискретной структуры на режущем инструменте показали более высокую эффективность в сравнении с традиционными покрытиями сплошной структуры из идентичного материала, одинаковой толщины и полученными по близким технологиям нанесения [1-5].

В настоящей работе рассмотрен опыт применения дискретных покрытий

для повышения работоспособности инструментов, оснащенных быстрорежущими сталями, твердыми сплавами и керамикой.

### **Основная часть**

*Дискретные покрытия на стальных инструментах.* Нитридититановые сплошные и дискретные покрытия одинаковой толщины наносили в установке ННВ-6,6-И1 [6] за один технологический цикл. Применяемые режимы обеспечивали получение покрытия, состоящего из нитридной фазы  $\epsilon$ - $\text{Ti}_2\text{N}$ . В качестве обрабатываемого материала приняты сталь 12Х18Н10Т и сталь 45, относящиеся к различным классам сталей по обрабатываемости. Резцы изготовляли из быстрорежущей стали Р6М5, толщина покрытия  $\sim 10$  мкм. Микротвердость основы  $\sim 6,5 \dots 7,0$  ГПа, покрытия  $\sim 17,5 \dots 18,3$  ГПа.

Образец из стали 12Х18Н10Т обрабатывали на токарном станке 1К62 без охлаждения с режимами резания: скорость резания  $v = 9,5$  м/мин, подача  $S = 0,07$  мм/об, глубина резания  $t = 0,5$  мм. Износ резцов по задней поверхности в области вершины замеряли прибором МБС-3. Коэффициент изменения стойкости резцов со сплошным и несплошным покрытиями определяли как отношение среднего приведенного износа на единицу длины пути резания для резцов со сплошным и дискретным покрытиями в исследуемых партиях к среднему приведенному износу на единицу длины пути резания для резцов без покрытия. Характер разрушения покрытий исследовали визуально при увеличении  $\times 10$  и  $\times 20$ .

Результаты сравнительных исследований проходных резцов из стали Р6М5 показали, что сплошное покрытие повышает их стойкость при точении образца из стали 12Х18Н10Т на 37,5%, а дискретное – на 93,3%.

На рис. 1 приведено типичное разрушение резцов со сплошным и дискретным покрытиями при одинаковой длине пути резания. Видно, что сплошное покрытие имеет тенденцию к отслоению в зоне резания, а разрушение дискретного покрытия локализуется в зоне единичного участка и происходит постепенно, что обуславливает большую стойкость инструментов.

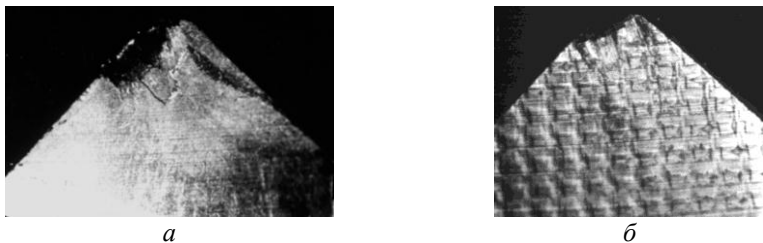


Рисунок 1 – Вид разрушенного участка инструмента из стали Р6М5 со сплошным (а) и дискретным (б) покрытиями после обработки образца из стали 12Х18Н10Т

Влияние вида покрытия на динамические характеристики процесса точения и шероховатость обработанной поверхности исследовали при обработке образца из стали 45 (167...207 HB).

Обработку проводили без охлаждения с режимами резания: скорость резания  $v = 100$  м/мин, подача  $S = 0,04$  мм/об, глубина резания  $t = 0,3$  мм. Шероховатость поверхности измеряли на профилометре-профилографе мод. 296 завода «Калибр».

Результаты исследования характера износа по задней поверхности резцов без покрытия, со сплошным и дискретным покрытиями в зависимости от длины пути резания (рис. 2) показали, что стойкость резцов со сплошным покрытием увеличивается на 18%, а с несплошным – на 64% [7].

Технологические составляющие силы резания с увеличением длины пути резания увеличиваются.

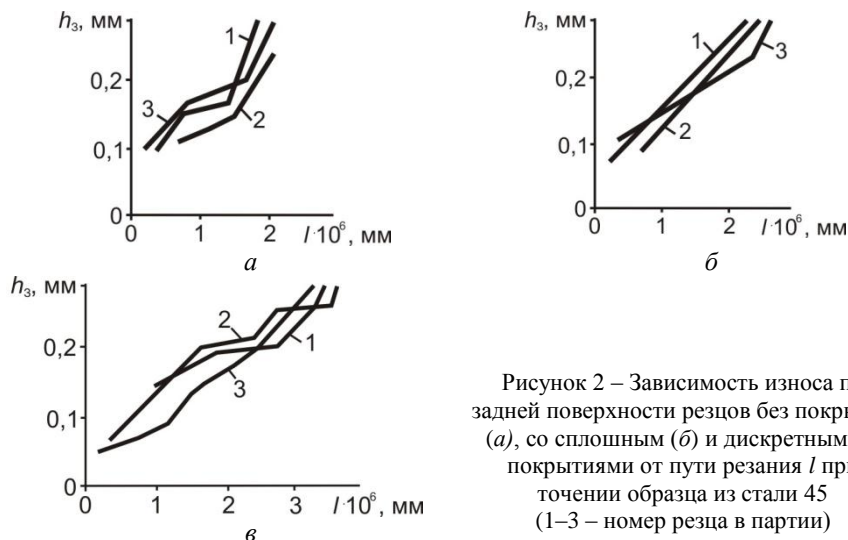


Рисунок 2 – Зависимость износа по задней поверхности резцов без покрытия (а), со сплошным (б) и дискретным (в) покрытиями от пути резания  $l$  при точении образца из стали 45 (1–3 – номер резца в партии)

Наибольшее увеличение силы резания характерно для резцов без покрытия [5], что объясняется снижением коэффициента трения в парах «обрабатываемое изделие-инструмент с покрытием», «стружка-инструмент с покрытием» и большей фактической поверхностью контактных участков инструмента с несплошным покрытием, способствующей большому теплоотводу в окружающую среду, в стружку и массив обрабатываемого изделия.

Шероховатость поверхности, обработанной резцами с покрытиями, ниже, чем на поверхности, обработанной резцами без покрытия. Это объясняется снижением динамических характеристик процесса резания, т.е.

работой системы СПИД в более благоприятных условиях. Одновременно с этим следует отметить, что при обработке резцами с дискретным покрытием шероховатость обработанной поверхности практически во всем исследованном диапазоне режимов резания ниже, чем при обработке резцами со сплошным покрытием. Это связано с улучшением условий работы системы СПИД и особенным характером разрушения единичных участков несплошного покрытия на резцах, способствующим реализации на инструменте эффекта «микромноголезвийности».

Сплошность покрытия  $\psi$  определяет механизм его изнашивания и шероховатость обработанной поверхности. Влияние сплошности дискретного покрытия  $\psi$  исследована для трех интервалов: – при сплошности  $\psi < 30\%$  имел место адгезионный характер изнашивания инструмента и на обработанной поверхности формировались значительные микронеровности; – при сплошности  $\psi = 50...70\%$  имел место абразивный механизм изнашивания инструмента. При этом износ резца минимизировался и обеспечивалась шероховатость обработанной поверхности  $Ra\ 0,63$ ; – при сплошности  $\psi = 80...95\%$  наблюдалось изнашивание за счет отслоения отдельных участков покрытия, что приводило к увеличению шероховатости обработанной поверхности.

*Упрочнение твердосплавных инструментов дискретными покрытиями.* Многогранные неперетачиваемые твердосплавные пластины из сплава Т15К6 испытывали в инструментах при обработке образца из стали 45. При этом определяли износ инструмента по задней поверхности (ширина фаски износа  $h_3 = 0,6$  мм) и шероховатость обработанной поверхности. Износ инструмента измеряли прибором МБС-3, а параметры шероховатости обработанной поверхности профилометром-профилографом мод. 296 завода «Калибр». Сплошное покрытие из TiN наносили на установке ННВ-6,6-И1 [6], дискретное покрытие – комбинированным способом. Толщина покрытия  $\sim 10$  мкм, в дискретном покрытии присутствовала «оконная» структура (время азотирования  $\sim 60$  мин).

Как и в случае применения инструмента из быстрорежущей стали, разрушение дискретного слоя покрытия на твердосплавных пластинах происходило по отдельным элементарным участкам, а сплошное покрытие растрескивалось и выкрашивалось.

Стойкость инструментов с дискретным покрытием при работе со всеми исследованными режимами резания в 2,5...3,0 раза выше, чем у резцов со сплошным покрытием (рис. 3). При этом разница в значениях стойкости увеличивается с интенсификацией режимов резания.

Шероховатость поверхности, обработанной резцами с дискретным покрытием поверхности, в 1,5...2,0 раза ниже, чем при обработке инструментами со сплошным покрытием, что обусловлено снижением динамических нагрузок процесса резания инструментом с несплошным

покрытием и характером разрушения единичных участков дискретного покрытия при термобарическом нагружении в процесса токарной обработки.

Резцы с дискретными TiN-покрытия, нанесенными вакуум-плазменным методом [6] на твердосплавные пластины ВК8, испытывали при точении образца из стали ХВГ (62...64 HRC) [4]. Толщина покрытия сплошного и дискретного – 8 мкм. Режимы точения выбирали в пределах: скорость резания  $v = 50...154$  м/мин; подача  $S = 0,1...0,3$  мм/об; глубина резания  $t = 0,10...0,25$  мм. За критерий стойкости принимали время до достижения фаской износа по задней поверхности резца ширины  $h_3 = 0,4$  мм.

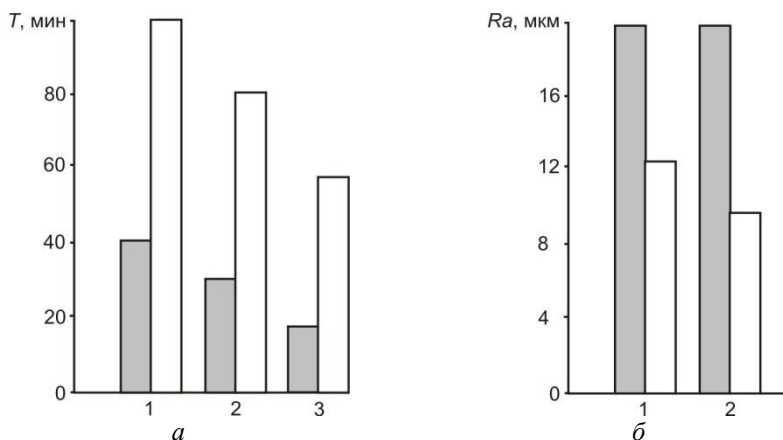


Рисунок 3 – Сравнительные диаграммы стойкости (а) твердосплавных инструментов и шероховатости (б) обработанной поверхности (темные столбцы – сплошное покрытие, светлые – дискретное):

1 –  $v = 160$  м/мин,  $S = 0,05$  мм/об,  $t = 0,5$  мм;

2 –  $v = 160$  м/мин,  $S = 0,05$  мм/об,  $t = 1,0$  мм;

3 –  $v = 160$  м/мин,  $S = 0,10$  мм/об,  $t = 1,0$  мм

Как показали исследования, вследствие значительных термобарических нагрузок сплошные покрытия в процессе резания растрескиваются и отслаиваются от основы на значительной площади (аналогично рис. 1, а). В то же время в покрытиях дискретной структуры отслоение отдельных участков практически отсутствует (аналогично рис. 1, б). При этом ресурс инструмента с покрытием дискретной структуры в 1,8...2,6 раза в сравнении с инструментом без покрытия и в 1,3...1,8 раза – в сравнении с инструментом со сплошным покрытием (рис. 4).

На рис. 5 приведена зависимость стойкости режущего инструмента с покрытием TiN от его сплошности  $\psi$ . Как видно, существует интервал оптимальных значения сплошности  $\psi$ , которые соответствуют условиям

оптимального напряженно-деформированного состояния покрытия и обеспечивают максимальную стойкость инструменту.

*Дискретные покрытия на керамическом инструменте.* В настоящей работе рассмотрено влияние сплошных и дискретных защитных покрытий, в частности, из TiN на износостойкость инструмента, оснащенного силинитом-Р – керамикой на основе  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , при непрерывном точении легированной термообработанной стали ШХ15 (62...64 HRC).

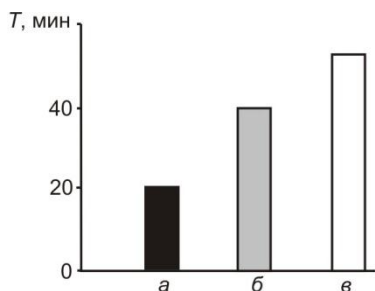


Рисунок 4 – Стойкость инструментов из твердого сплава ВК8 при точении стали ХВГ (62...64 HRC):

а – без покрытия;  
б – сплошное покрытие TiN;  
в – дискретное покрытие TiN

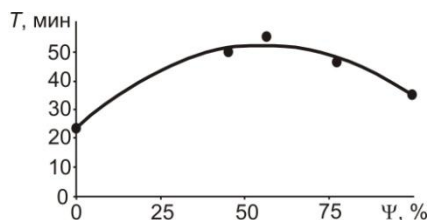


Рисунок 5 – Зависимость стойкости инструмента от сплошности покрытия  $\psi$

Износостойкие покрытия из TiN толщиной 8 мкм наносили методом катодного распыления на установке ННВ-6,6-И1 типа «Буллат» [6].

Режим точения: скорость резания  $v = 60$  м/мин, подача  $S = 0,1$  мм/об, глубина резания  $t = 0,25$  мм.

Установлено, что сплошное защитное покрытие обеспечивает увеличение стойкости режущего инструмента в 1,7 раза по сравнению с инструментом без покрытия, дискретное – в 2,2 раза (рис. 6).

Упрочняющий эффект дискретного покрытия на инструменте увеличивается с ужесточением режимов резания.

С увеличением скорости резания возрастает интенсивность изнашивания резцов как со сплошным покрытием, так и с дискретным. Однако, во втором случае значения износа существенно ниже (в 1,3 раза при скорости резания 90 м/мин и в 1,6 раза – при 146 м/мин). С увеличением подачи от 0,15 до 0,30 мм/об, при постоянных скорости и глубине резания (146 м/мин и 0,25 мм соответственно), наблюдается та же тенденция. Причем для резца со сплошным покрытием при подачах 0,26 и 0,30 мм/об на 20-й минуте точения достигается критический износ по задней поверхности (0,4 мм), в то время

как для резца с дискретным покрытием эти значения составили 0,10 и 0,35 мм соответственно.

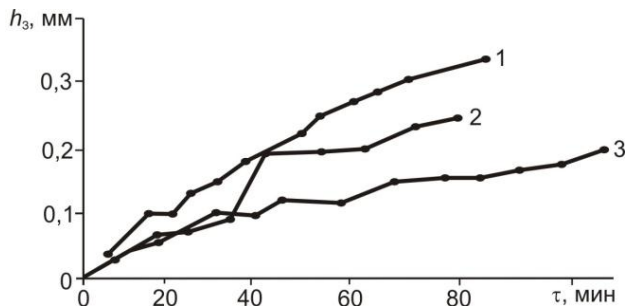


Рисунок 6 – Зависимость износа по задней поверхности резца от времени точения стали ШХ15:

1 – резец без покрытия;

2, 3 – резцы со сплошным и дискретным покрытием из TiN соответственно

Таким образом, с увеличением как скорости резания, так и подачи, резец с дискретным покрытием проявляет более высокие эксплуатационные качества. Замена традиционного сплошного покрытия дискретным позволяет минимизировать уровень напряжений в покрытии. Высокая когезионная и адгезионная стойкость отдельных участков защитного слоя достигаются путем ограничения нормальных напряжений, максимум которых будет находиться в центре фрагмента, и касательных напряжений, которые будут концентрироваться на периферии фрагмента. В дальнейшем будет разрушаться часть покрытия, которая обуславливает локальную концентрацию касательных напряжений [8].

Износ резца с дискретным покрытием незначительно увеличивается при длительном времени точения. Для эталонного резца (без покрытия) увеличение износа на 0,1 мм достигается за 20 мин точения, для дискретного покрытия – за 85 мин.

На рис. 7 приведена зависимость износа резцов с различными покрытиями от времени резания при точении закаленной стали ХВГ (62 HRC). Преимущество дискретных покрытий очевидно. Дискретные покрытия TiN, CrN/(Cr,Zr)N и (Al,Cr)N обеспечивают практически полное отсутствие износа резца в первые 10...13 мин резания.

Дискретные покрытия на режущих инструментах из керамики повышают их стойкость в 2,0...3,5 раза в сравнении с традиционными покрытиями сплошной структуры. При чистовом точении закаленной стали дискретные покрытия на инструменте позволяют повысить скорость резания с 60...80 м/мин до 110...120 м/мин.

### **Заключение**

Как показывают результаты исследований и практический опыт, защитные покрытия дискретной структуры, в сравнении с традиционными сплошными покрытиями, более эффективно повышают работоспособность режущих инструментов.

Принцип дискретной структуры позволяет решить основное противоречие, возникающее при использовании покрытий, – преодолеть их хрупкость. В слоях с дискретной структурой обеспечивается ограничение роста напряжений и минимизируются условия реализации процесса трещинообразования, что значительно повышает прочность покрытий и стойкость инструментов с покрытиями, полностью исключая их когезионное растрескивание и адгезионное отслоение.

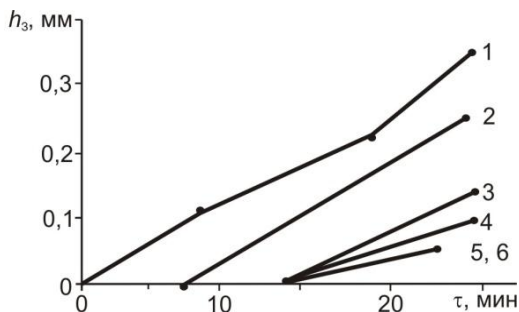


Рисунок 7 – Зависимость износа по задней поверхности керамических резцов с покрытиями от времени точения образца из стали ХВГ ( $v = 75$  м/мин;  $S = 0,07$  мм/об;  $t = 0,25$  мм):

- 1 – резец без покрытия; 2 – TiN (двойная бомбардировка, сплошное покрытие);  
 3 – TiN (дискретное покрытие); 4 – CrN (CrZr)N; (сплошное покрытие);  
 5 – CrN (CrZr)N (дискретное покрытие); 6 – (Al, Cr)N (дискретное покрытие)

**Список использованных источников:** 1. Матвеев Н.В. Служебные и физико-механические свойства несплошного нитридтитанового покрытия // Сварочное производство. – 2006. – № 9. – С. 16–21; 2. Антонюк В.С., Ляшенко Б.А., Сорока Е.Б. Выбор параметров покрытий дискретной структуры при модификации поверхности режущего инструмента // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – № 3. – С. 49–50; 3. Антонюк В.С., Сорока О.Б., Калініченко В.І. Аналіз напружено-деформованого стану різального інструменту з покриттями // Вісник Національного технічного університету України „Київський політехнічний інститут”. Сер. Приладобудування. – 2004. – Вип. 27. – С. 84–89; 4. Антонюк В.С. Дискретні покриття на різальному інструменті / В.С. Антонюк, О.Б. Сорока, Б.А. Ляшенко та ін. // Проблеми прочності. – 2007. – № 1. – С. 138–143; 5. Матвеев Н.В. Влияние износостойких покрытий на стойкость проходных резцов и динамические характеристики процесса резания при точении стали 45 / Н.В. Матвеев, И.В. Милосердов, О.В. Цыгулев, Е.В. Сидоренко // Сб. науч. тр. НИАТ. – М.: НИАТ, 1988. – С. 24–29.; 6. Патент України 26322. Установка для вакуум-плазмового напыления // Бюл. «Промислова



власність». – 2007. – № 14; 7. Солових Є.К. Науково-методологічні основи підвищення несучої здатності функціональних покриттів конструктивними і технологічними методами: автореф. ...докт. дис. – К: НТУУ КПІ, 2013. – 36 с.; 8. Гнесин Г.Г. Износостойкость керамических режущих инструментов на основе нитрида кремния со сплошными и дискретными нитридотитановыми покрытиями / Г.Г. Гнесин, Б.А. Ляшенко, С.Н. Фоменко и др. // Порошковая металлургия. – 1999. – № 11/12. – С. 93–97.

**Bibliography (transliterated):** 1. Marveev N.V. Slezhebnye i fiziko-mehanichnye svoystva nesploshnogo nitridotitanovogo pokrytija // Svarochnoe proizvodstvo. – 2006. – № 9. – S. 16–21; 2. Antonyuk V.S., Ljashenko B.A., Soroka E.B. Vybory parametrov pokrytii diskretnoi struktury pri modifikatsii poverkhnosti rezal'nogo instrumenta // Uprochjajustchie tehnologii i pokrytija – 2005. – № 3. – С. 49–50; 3. Antonyuk V.S., Soroka O.B., Kalinichenko V.I. Analiz napruzhenno-deformovanogo stanu rizal'nogo instrumentu z pokryttjam // Visnyk Natsional'nogo tehničnogo universytetu Ukrainy «Kievskii politehnichnyi institut». Ser. Prylادobuduvannja. – 2004. – Vyp. 27. – S. 84–89; 4. Antonyuk V.S. Diskretni pokryttja na rizal'nomu instrumenti / V.S. Antonyuk, O.B. Soroka, B.A. Ljashenko ta in. // Problemy prochnosti. – 2007. – № 1. – S. 138–143.; 5. Matveev N.V. Vlijanie isnosostoykikh pokrytii na stoykost' prohodnykh reatsov i dinamicheskie charakteristiki protsessu resanija pri tochenii stali 45 / N.V. Matveev, I.V. Miloserdov, O.V. Tsigulev, E.V. Sidorenko // Sb. nauch. tr. – M.: NIAT, 1988. – S. 24–29.; 6. Patent Ukrainy 26322. Ustanovka dlya vakuum-plasmennogo napylennja // Byul. «Promyslova vlasnist'». – 2007/ – № 14; 7. Solovyh E.K. Naukovo-metodologichni osnovy pidvystchennja nesuchoi sdatnosti funktsionalnyh pokryttih konstruktivnymy i tehnologichnymy metodamy: avtoref. ...dokt. dis. – K: NHTUU KPI, 2013. – 36 s.; 8. Gnesin G.G. Iznosostoikost' keramicheskikh rezhustchih instrumentov na osnove nitride kremnija so sploshym i diskretnym nitridtitanovymy pokryttijami / G.G. Gnesin, B.A. Ljashenko, S.N. Fomenko i dr. // Poroshkovaja metallurgija. – 1999. – № 11/12. – S. 93–97.